

地下工程的岩石力学

第三届国际岩石力学会议报告

M.D.G. 沙拉蒙 著

田良灿 连志昇 译

冶金工业出版社

地下工程的岩石力学

第三届国际岩石力学会议报告

M.D.G. 沙拉蒙 著

田良灿 连志昇 译

冶金工业出版社



A913961

内 容 提 要

本书是根据M.D.G. Salamon 1974年在美国丹佛市召开的第三届国际岩石力学会议上所作的综合报告“Rock Mechanics of Underground Excavation”译出的。

书中详细介绍了地下工程岩石力学问题的近代理论成果。特别着重于介绍地下矿山的采场、巷道和辅助硐室的设计原理,其中,包括房柱法板状采场和三维采场的应力和应变分布的计算,各类支护系统的适应性,保安矿柱设计;还讨论了地表沉降和深部开采时的岩爆和矿山地震等问题。

在内容的叙述上,作者采用了严密的理论分析方法。同时,在每一分析之后,还给出了工程计算实例。因此,本书是一本有代表性的理论专著。可供从事岩石力学的科研、设计人员阅读,也可供高等院校有关专业的师生、研究生作为教学参考书。

地下工程的岩石力学

第三届国际岩石力学会议报告

M.D.G. 沙拉蒙 著

田良灿 连志昇 译

冶金工业出版社出版

(北京百万庄14号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张7字数183千字

1982年5月第一版 1982年5月第一次印刷

印数00,001~2,700册

统一书号:15062·3775 定价0.90元

译者序

为了系统地介绍世界现代岩石力学的最新成就，我们一直重视对各届国际岩石力学会议资料的介绍。在决定选择第三届国际岩石力学会议（1974年在美国丹佛市召开）的论文时，特别只选择了M.D.G.沙拉蒙的综合报告“Rock Mechanics of Underground Excavation”。因为这篇报告，实际上是一部关于地下工程岩石力学的理论专著。它简练地概括了现代岩石力学——特别是地下矿山岩石力学问题的理论成果，而这些问题对矿山开采的研究和设计是十分重要的。

本书共分九章。前两章论述地下工程岩体力学的基本问题，即关于岩石和岩体性质，由开采作业引起的应力变化和能量变化。第三章论述线弹性岩体中地下空洞的应力和位移，从二维空洞出发，最后论述了三维空洞的情况，应用相关定理把线弹性问题很简捷地推广到粘弹性问题上。从第四章开始，全面讨论了工程实践问题，包括支护原理、单一硐室的设计，生产采场的岩石力学问题以及采场和相邻巷道或硐室的互相影响。最后两章叙述了关于地表移动和深部开采的岩爆和地震问题。特别要提到，第四章关于支护设计，考虑了支护中几乎目前所出现的全部问题，从弹性问题一直讨论到粘-塑性问题。第六、七章叙述特别详细，从浅部采场讨论到深部采场，并介绍了矿柱，特别是保安矿柱的设计原理。最后一章详细讨论了震源岩音定位问题，并指出了三维测震网中的拾震器的最佳排列方式。

书中不足之处是几乎未提到现场测试原理和方法。这样就无从验证书中作了严格证明的理论应用的可靠性。另外，在提到一些数值解法（例如有限元法）时，则过于简单，只推导出O.C. Zienkiewicz的研究工作。

译者

1980年12月

目 录

第一章 岩石和岩体	1
§ 1.1 引言	1
§ 1.2 岩石的力学性态	2
§ 1.3 岩体的构造特性	8
第二章 地下采空区引起的基本变化	12
§ 2.1 应力状态的变化	12
§ 2.2 能量变化	15
§ 2.3 采空区尺寸的微小变化引起的能量变化	20
§ 2.4 裂隙中流体分布的变化	25
第三章 “线弹性”岩体中的硐室引起的应力和位移	30
§ 3.1 引言	30
§ 3.2 巷道和准二维硐室	31
§ 3.3 板状采空区的概念	34
§ 3.4 板状采场的模拟和数值分析	37
§ 3.5 三维采场	42
§ 3.6 粘-弹性岩体问题	46
第四章 硐室支护原理	51
§ 4.1 支护的目的和分类	51
§ 4.2 围岩和支护组成的静不定结构	53
§ 4.3 一些实际因素的考虑	55
第五章 单一硐室或巷道的设计	57
§ 5.1 硐室或巷道围岩性态的估计	57
§ 5.2 粘-弹性岩层中的支护设计	58
§ 5.3 粘-塑性岩层中的支护设计	64
§ 5.4 脆性岩层中的巷道	72
第六章 生产采场	74

§6.1	引言	74
§6.2	深部的一些简单板状采场	74
§6.3	中深和浅部的单一采场	89
§6.4	浅部和深部板状矿体的开采	95
§6.5	板状采场布局的设计	99
§6.6	房柱法开采——矿柱载荷的计算	104
§6.7	房柱法开采——常规设计	123
§6.8	房柱法开采——稳定和不稳定	126
§6.9	一般形状的采场	144
第七章	生产采场和辅助巷道或硐室之间的相互影响	147
§7.1	引言	147
§7.2	辅助硐室支护中的应力	148
§7.3	辅助硐室的保护	150
§7.4	竖井保护	154
§7.5	隔水矿柱的设计	163
第八章	地表沉降	166
§8.1	引言	166
§8.2	地表沉降引起的危害	167
§8.3	按比值 s_m/H 对沉降模式进行分类	169
§8.4	地表沉降的预测	170
§8.5	临界深度 H_c	177
§8.6	地表设施的保护	179
第九章	地震和岩爆	188
§9.1	地震活动的机理	188
§9.2	震源定位	194
§9.3	地震观测网的应用	206
§9.4	岩爆危险的控制	206
参考文献		207

第一章 岩石和岩体

§ 1.1 引言

第三届国际岩石力学会议议程打算按五个主题讨论岩石力学的各种问题。其中之一是专门讨论岩石和岩体的性质。因此，为了避免重复，这里只讨论这个广泛课题中对了解地下空洞的力学特性特别重要的那些问题。

一般说来，物理问题的求解，可用经验（现场调查）方法，数学理论方法或模型试验法。

原则上，纯粹的经验方法是建立在一系列对比试验的基础上，在试验中，依次研究每个变量的影响。遗憾的是，在地下采空区的研究中，要完成大量的试验以获得定量的通解，无论在经济上和技术上都不大可能。

理论上的方法是建立在数学模型或理想化模型（模型性质完全确定）的基础上。如果所选模型性态很相似原型（实际上模型和原型之间并不完全一致），则根据模型的物理性质可能得到实际问题的解答。通常，这些物理性质的数值是根据小尺寸试件的室内试验确定的。今天，由于数字计算机的迅速发展，往往有可能研究各变量的影响，而无需花费过多的人力和财力。理论家面临的主要困难是如何选择和制造最佳模型，以及确定这种模型的物理常数。要制作能描述出所有条件下符合原型性态的理想化模型是很困难的。同样，为了决定开采参数，要确定一种能把实际采矿问题缩小成实验室模型，这种可能性实际上是很小的（虽然对于这种说法也曾出现过例外的情况）。

第三种方法是采用试验模型。用模型进行研究基本上是一种经验方法，即在缩小的模型上进行对比试验。在很多情况下，在实验室人工模型上进行必要的多次试验是可行的，而在现场这

样做就不现实了。虽然模型法有这些优点，但未能证实在解决岩石力学问题上是完全有效的。这是因为只有当模型性态相当近似于原型时，模型试验才能取得满意的结果（在这方面，实验工作者的困难与理论家的困难是相同的）。制作一个物理模型模拟原型，而把原型的材料性态视为单一的（如弹性的），这样比较容易，目前，这种情况用数值方法更容易处理。相似模型的真实优点表现在对复杂材料性态的分析上（例如，模拟周围部分岩体已破坏的采空区），但在这种情况下，由于模型制作和加载的困难，以及缺乏适当的模型材料，妨碍了相似模型的使用。

显然，当研究地下空洞的力学问题时，不能指望一种简单的完全有效的方法。近十年来，由于经验和理论方法的密切配合，在这一领域已取得很大的进展。最简单的理想化模型，如线弹性模型已获得广泛应用，并取得了有用的成果。为了使这些成果更为逼真，数学模型的物理参数是根据现场试验测得的，而不是根据小试件的室内实验。毫无疑问，如果细心地进行实验室试验，那么现场工作和理论研究紧密配合将会使这方面的工作得到进一步的进展。

§ 1.2 岩石的力学性态

地下空洞通常是开挖在由几种不同类型的岩石组成的岩体中，岩石的物理结构呈现不同的形态，这取决于岩石的成因和所考查的标准。火成岩是各种矿物的结晶集合物，沉积岩是由某些矿物颗粒沉积而成。

了解岩石的力学性态对于研究地下工程的设计是很必要的。岩石的应力-应变关系和破坏是这一广泛课题中最重要 的方面。近来，Jaeger和Cook(pp.102~183)^①给出了应力状态下岩石性态的很好总结，这里不打算对这一课题作广泛的说明。目的只是扼要提一下这一进展很快的研究课题中近代最重大的发展。在这

① 参看《Fundamentals of Rock Mechanics》的页数，下同。——译注

方面应注意的是：岩石的实验室研究的某些发展已经超出实际应用，因为这些发展与本书的主题内容有关。

1. 应力-应变关系

固体的应力和位移的研究要涉及应用下述三组方程式：(a) 平衡（或运动）方程式；(b) 位移和应变之间的关系；(c) 应力-应变关系。这些关系式中的第一和第二组分别属于静力学和几何学的范畴，所以它们与固体的实际性态无关。推导这些公式时，唯一所作的物理假设是：所讨论的固体是连续的，而且，受应变之后仍保持连续。在研究岩石时，当应力增至接近强度极限，这一假设通常是合理的，但它不适用于研究岩体。

此外，常常假设应变值很小，或通常把它称为“无穷小”。这一假设与被分析问题的性质有关，而与物质的性态无关。然而，作这样的假设会使问题大为简化。这些简化主要由于：当应变为无穷小时，不需区别岩石在受应变前后所处的坐标。

应力-应变关系规定受力材料的性态，并以这种关系来表示理论静力学和几何学概念与物理问题之间的关系。现在确认，大多数岩石的全应力-应变关系（图 1.2.1）是由上升线段 AB 和下降线段 BC 组成的。这也许

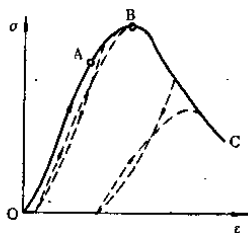


图 1.2.1 岩石的全应力-应变曲线
(Jaeger 和 Cook 的试验结果)

是研究应力-应变关系最近所取得的最重要进展。按照 Jaeger 和 Cook 的观点 (p.77)，只要材料能保持永久变形而不会失去其支撑载荷的能力，那么它就是处于塑性状态。相反地，如果支撑载荷的能力随变形的增加而降低，则可认为材料是处于脆性状态。因此，图 1.2.1 表示岩石分别处于这两种状态（AB 段为塑性段，BC 段为脆性段）。

在地下硐室的开挖过程中，特别是深部矿山，围岩的某一部分往往变成脆性状态。因此，如要充分了解地下工程的力学问

题，就必须考虑应力-应变关系中这一脆性段的影响。因为实验室抗压试验的破坏机理是地下洞室围岩性态的复杂得多的机理的一种最简单形式，故值得详细分析这类试验 (Jaeger和Cook, pp.167~171; Salamon, 1970)。

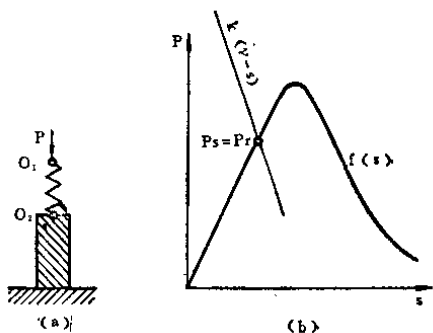


图 1.2.2 (a) 理想的加载系统; (b) 岩石抗力和载荷之间的平衡条件

试验时，因试件和试验机都受力，故两者均产生变形。在最简单的情况下，可以用一个逐渐加载的弹簧-试件等效系统来代替由试验机和岩石试件组成的加载系统 (图1.2.2(a))。

在加载过程中，弹簧的两端都向下移动。如果上端点 O_1 的位移是 γ ，下端点 O_2 的位移是 s ，那么作用在弹簧上的力 P_s 由下式给出：

$$P_s = k(\gamma - s) \quad (1)$$

式中， k 是弹簧常数。该式表明，弹簧的载荷-位移关系即是试验机的加载直线。

令岩石的力-位移关系为：

$$P_r = f(s) \quad (2)$$

因系统必处于平衡，故这些力必须相等，即：

$$k(\gamma - s) = f(s) \quad (3)$$

(3) 式表示的关系曲线如图1.2.2 (b) 所示。

整个系统不会产生自发的变化，也就是说，在不增加外来的能量时，只要弹簧不可能使试件进一步产生变形，(3) 式所表示的平衡就是稳定的。如果 γ 保持不变，就没有另外的外部能量加到这一系统上。点 O_2 的微小位移为 Δs 时，如果弹簧所作的功 ΔW_s 小于引起岩石相同位移所需要的功 ΔW_r ，即是：如果

$$\Delta W_r - \Delta W_s > 0 \quad (4)$$

则平衡是稳定的。在小位移时，弹簧对岩石所作的功为：

$$\Delta W_s = \left(P + \frac{1}{2} P_s \right) \Delta s \quad (5)$$

使岩石产生进一步变形所需要的功为：

$$\Delta W_r = \left(P + \frac{1}{2} P_r \right) \Delta s \quad (6)$$

由 (1) 式和 (2) 式可以分别得到两种力的变化 ($\Delta \gamma = 0$)：

$$\Delta P_s = -k \Delta s, \quad \Delta P_r = f'(s) \Delta s = \lambda \Delta s \quad (7)$$

(7) 式中的 λ 表示试件的力-位移曲线的斜率。

把 (7) 式代入 (5) 式和 (6) 式，然后代入到 (4) 式，可得：

$$\frac{1}{2} (k + \lambda) \Delta s^2 > 0 \quad (8)$$

这一结果表示，仅当

$$k + \lambda > 0 \quad (9)$$

时，由 (3) 式所确定的平衡才是稳定的。

力-位移曲线的斜率在 OB 段是正的，而在脆性段 BC 是负的。因为规定 k 是正的，所以只要试件抵抗变形的抗力随变形的增加而增加 (OB 段)，不等式 (9) 就表示这种平衡是稳定的，而与试验机的刚度无关。然而，对于变形曲线的下降部分 BC 段所描述的情况而言，对稳定性不可能作出统一的解释。在 BC 段，只有达到弹簧加载直线与力-位移曲线相切的那一点，平衡才会是稳定的 (图1.2.3)。在这一点上，试验将会被岩石的突然破坏所中断，然而，如果力-位移曲线的最小斜率 λ_m 满足不等式 $k + \lambda_m > 0$ ，

则整个试验不会发生突然破坏。

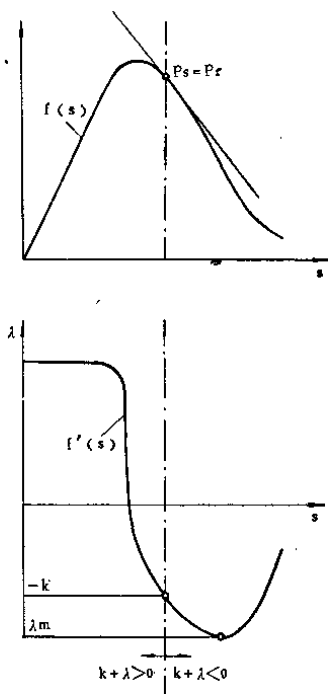


图 1.2.3 用 $f(s)$ 和 $f'(s)$ 表示非稳定性准则

这些简单的研究结果表明，当部分岩体进入脆性状态时，可能产生一些很复杂的问题。在这些情况下，平衡状态是否稳定，将取决于岩体的破坏部分和未破坏部分之间的相互作用，就稳定性而论，不可能作出一般推论。

Drucker (1964) 在一篇特别有趣的论文中提出了稳定物质这一术语，它是稳定系统这一术语的专业名词。所谓稳定系统，其型态是由加载过程所决定的，在某种意义上，微小的扰动会使

特性曲线出现微小变化，而型态不会产生自发的变化。

按照Drucker (1964) 的意见，在上述意义上，一种物质达到稳定的充分条件是：

$$\delta\sigma_{ij}\delta\epsilon_{ij} > 0 \quad (10)$$

式中， $\delta\sigma_{ij}$ 和 $\delta\epsilon_{ij}$ 分别是任意无穷小应力变化和相应的无穷小应变变化。同时，在(10)式中也采用了一般的张量符号，因此，在这些项中二个注脚表示求和。如果一种物质满足不等式(10)，则关系到这种物质的任何问题的平衡状态将是稳定的。例如，前面讨论的岩石试件的变形曲线的下降部分就是这种情况。

至今，应力分析中所有理论上的发展实际上是建立在稳定物质的基础上。除了Deist早期(1965, 1966)所做的工作以外，似乎对建立能够说明脆性状态下岩石性态的理想模型还无什么研究。显然，这是一个重要的领域，在不远的将来将会取得重大的进展。这些问题对研究矿柱的稳定性和岩爆的实际意义将分别在§6.8和§9.1中讨论。

2. 岩石的强度

或许，在以前的研究工作中，研究强度性质的分类要比研究岩石性态的其他方面的问题要多。尽管作了大量的研究，但我们仍然怀疑，是否能在所有情况下作出洞室围岩破坏的可靠预报。

预报的困难主要在于：第一，岩石是一种包含各种大小弱面的复杂物质，通常，小试件的试验结果只包括最微细的弱面的影响。由于节理、裂隙等弱面的存在，根据这些试验结果来推断现场地下情况就会受很大影响，因为节理、裂隙对岩体的性态可能有很大的影响。第二，是强度本身的定义问题。长期来认为岩石的强度不能用某个单一的物理量来确定。最通用的强度定义也许是按下述不等式确定：

$$\sigma_1 \leq a\sigma_3 + b \quad (11)$$

式中， a 和 b 是岩石的参数， σ_1 和 σ_3 分别是最大和最小主应力。采用这一不等式（或同一目的的其他公式）的含意是：所设计的任何岩石构筑物，若不满足(11)式，那么将会发生破坏，甚至

会倒塌。但是，在前面讨论图1.2.1时，就已知道问题并不是这样。事实上，即使岩石的变形大于式(11)取等号时的对应变形，岩石仍然能支撑一定的载荷。因此，可将(11)式解释为确定岩石所能承受的最大主应力的表达式，但是，一旦等式成立，我们也不能由此得出岩石的强度（或状态）。

3. 有效应力

有效应力的概念首先是由Terzaghi为了研究饱和土提出来的，但后来发现，如果假定岩石的渗透性足以允许液体流动，它也能用于研究岩石力学问题（Jaeger和Cook，pp.206~214）。Serafim（1968）曾给出了这个问题的另一种解释。

Terzaghi认为，饱和土的破坏和变形受有效应力

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}p \quad (12)$$

所控制。式中， σ_{ij} 是总应力分量， δ_{ij} 是Kronecker δ （ $\delta_{ij}=1$ ；当 $i=j$ 时， $\delta_{ij}=0$ ）^①， p 是孔隙压力。对水饱和的岩石而言，强度的定义可用有效最大主应力 σ'_1 和最小主应力 σ'_3 来表示：

$$\sigma'_1 \leq a\sigma'_3 + b \quad (13)$$

§ 1.3 岩体的构造特性

除个别情况外，地下硐室不会开挖在完整的岩石内，而经常是开挖在由不同岩性的岩石组成的岩体中，这种岩体存在着许多地质上的影响因素和构造应力。根据岩石力学的观点，岩石的岩性，以及任何地质构造（如节理，层面，片理面，剪切带，岩脉和断层等）对岩石强度、变形性质或渗透性可能有很明显的影响（Deere，1968）。

岩石力学的早期发展的最严重缺点也许是没有注重地质因素影响的定量研究。作为一门应用科学，工程地质的近代发展正在迅速地填补这一空白。然而，必须承认，目前尚未达到充分利用各种填图和勘探技术来搜集地质资料的阶段。

1. 构造特性

① 原文有误。——译注

地壳内的应力主要是压应力，因此，特别是在很深的部位，通常作用在地质不连续面附近的足够大的正应力会产生摩擦阻力，这种摩擦阻力阻止一对相对弱面的滑移。原始应力分布的这种有利特性降低了地质特征（如节理，断层）的重要性。当然，采场附近的原始应力分布往往有很大变化，破坏了上述那种有利条件而使这些不连续面变得很重要。

分析地下采空区的安全问题时，节理的间距与空区的典型线性尺寸之比是一个重要参数。若这一比值小，则对节理或层理而的间距相对空区尺寸而言，是密集的。在这种情况下，在决定采空区稳定性问题中，不连续面似乎起着支配作用。这方而的另一个重要因素是不连续而与采空区四周表面之间的几何关系。显而易见，即使从构造特征的影响这一简短而不完全的说明就可明显看出，增大采空区的规模和减小埋藏深度会增大地质不连续面的影响。

2. 变形特性

岩体是由不同类型的岩石组成的，每种岩石有不同的变形特性。此外，岩体内的不连续性也影响总体变形。在这种情况下，要精确模拟这种复杂岩体的性态是有很困难的。尽管应力分析的数值解法有新的发展，但仍然有很大的困难。数值分析方法之一是有限元法（在第三章中讨论），这种方法能得出由不同性质的材料组成的介质的一些问题的解。

另一种处理分割岩体单元的方法是确定一种等价的均匀岩体。Salamon(1964)在这方面已取得了某些进展，他引用一种等价介质来处理在弹性范围内成层的岩体。Wardle和Gerrard(1972)应用他的研究成果分析不同成分组成的多层岩石。由于解决各种特殊问题（特别是沉积岩）有它的特殊意义，这里简述一下作者的分析结果。

我们在分析中假定：所有岩层都是均匀、横观各向同性的（Lekhnitskii, 1963, pp.24~25），岩层厚度及弹性性质随机变化。而且，假定物体变形之后保持连续，层间接触面不产生相

对位移。这种分析是建立在对比两个相同尺寸的立方块岩体性态的基础上，其中一个立方体是切自岩体，另一个切自等价的均质介质。假定层面互相平行，因此，要这样来切割岩石立方体使其两边与这些层面平行。立方块要切成足够大，使之能构成一个有代表性的岩体试件。

这样规定的立方体将具有一定的弹性对称性。若围绕垂直层面的轴旋转和相对于某一层面的挠曲，轴旋转立方体的性态都保持不变，前者是由于岩层的几何形状而得出的，后者是由于假定了岩层厚度和性质是随机的，以及岩石立方块是有代表性的。因此，可以得出结论，等价介质将是横观各向同性的，其应力-应变关系可由下式给出：

$$\begin{aligned}\varepsilon_{11} &= \frac{1}{E_1}(\sigma_{11} - \nu_1 \sigma_{22} - \nu_2 \sigma_{33}) \\ \varepsilon_{22} &= \frac{1}{E_1}(-\nu_1 \sigma_{11} + \sigma_{22} - \nu_2 \sigma_{33}) \\ \varepsilon_{33} &= \frac{\nu_2}{E_1}(-\sigma_{11} - \sigma_{22}) + \frac{1}{E_2} \sigma_{33} \\ \varepsilon_{12} &= \sigma_{12} / G_1 \\ \varepsilon_{13} &= \sigma_{13} / G_2 \\ \varepsilon_{23} &= \sigma_{23} / G_2\end{aligned}\quad (1)$$

此时，轴 x_3 是垂直于层面，面

$$G_1 = E_2 / 2(1 + \nu_1) \quad (2)$$

为了确定(1)式中五个独立的弹性常数，采用岩石立方块中最简单的许用应力和应变分布。然后使储存于两个岩石立方块中的应变能相等，就可以得到结果。为了简单起见，只有当所有岩层都是各向同性的，即厚度为 h_i 的第 i 层的杨氏模量和泊松比分别是 E_i 和 ν_i ，才能引用这五个常数的公式。

令立方体边长为 L ，引用比值：

$$\varphi_i = h_i / L, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中， n 是立方岩块的层数，显然

$$\sum \varphi_i = 1 \quad (4)$$

这里和后面的公式中，相对于下标 i 求和是从 1 到 n 。采用这些符号表示的弹性常数如下：

$$\nu_1 = \frac{\sum \frac{\varphi_i \nu_i E_i}{1 - \nu_i^2}}{\sum \frac{\varphi_i E_i}{1 - \nu_i^2}}, \quad \nu_2 = (1 - \nu_1) \sum \frac{\varphi_i \nu_i}{1 - \nu_i}$$

$$E_1 = (1 - \nu_1^2) \sum \frac{\varphi_i E_i}{1 - \nu_i^2}, \quad G_2 = \frac{1}{\sum \frac{\varphi_i}{G_i}} \quad (5)$$

$$E_2 = 1 / \left\{ \sum \frac{\varphi_i (1 + \nu_i) (1 - 2\nu_i)}{(1 - \nu_i) E_i} + \frac{2\nu_2^2}{(1 - \nu_1) E_1} \right\}$$

从 (2) 式和 (4) 式将看到

$$G_1 = \sum \varphi_i G_i \quad (6)$$

所以，两个剪切模数之比 G_1/G_2 往往大于 1，这是因为：

$$G_1/G_2 = \Phi = (\sum \varphi_i G_i) / (\sum \varphi_i / G_i) > 1 \quad (7)$$

若 E_i 、 ν_i 和 φ_i 的分布为已知，则 (4) 式可用来确定等价介质的弹性常数。

3. 现场测量

毫无疑问，一般只有用现场实测方法才能合理地描述岩体特性，这种方法是通过不连续面的野外勘测，以及现场试验来测定变形特性。搜集和分析现场（特别是在地面和靠近地表的工程）资料的技术已取得了很大进展。但这个问题超出本书讨论的范畴。

4. 岩体的分类

除了绘制地质图和地质构造统计图外，还希望得到现场的岩石分类。这种分类会促进工程专家们之间的联系，而且能大致地指出开挖期间可能遇到的困难。岩石分类可按不同的标准来划分：Deere (1963) 根据节理间距进行分类，Hansagi (1966) 和 Deere (1968) 根据系统的分析岩芯采取率进行分类，而 Onodera (1963) 根据对比现场和实验室试件测定的压缩波速进行分类。